

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

マルチコイルモータによる駆動領域拡大

著者	梅澤 克之
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	60
ページ	1-5
発行年	2019-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00022011

マルチコイルモータによる駆動領域拡大

DRIVE ZONE EXPANSION BY THE MULTI-COIL MOTOR

梅澤克之

Katsuyuki UMEZAWA

指導教員 安田彰

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

A variable field magnet motor for the purpose of the expansion of the drive zone is suggested. However, structure and the control of this motor are complicated, and a high hardware technology and control technology are necessary. Therefore, a separately excited motor with simple structure and control is used in this article. This paper aims to expand the drive zone by dividing the stator coil into multiple parts, and verify field-characteristics by multi-coil. Actual measurement results show the expansion of the drive zone and improvement of the drive efficiency when driven with conventional single coil and multi-coil.

Key Words : torque characteristic, power efficiency, field characteristic, multi-Coil

1. はじめに

近年、地球温暖化や大気汚染などの環境問題が深刻であり、自動車分野ではハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)などモータを動力源とした次世代自動車の開発が盛んである。このような自動車には、広範囲な駆動領域と高効率駆動が要求される[1]。この要求を満たす手法として可変界磁モータや弱め界磁制御が注目されている[2]。これらの手法は界磁磁束を調整する事により適切な回転数およびトルクを取得でき、さらに駆動領域を拡大する事ができる。しかし、制御や構造が複雑になってしまう事が課題点として挙げられる。

一方、他励モータは単純な構造で制御が簡易である。このモータは界磁巻線と電機子巻線が接続されていないため、各巻線を個別に制御する事ができ広範囲な駆動領域と精密な制御が可能である。そこで、界磁電流を直接制御する手法を検討する。

1つの手法として、コイルをマルチコイル化し複数のコイルをデジタル信号で制御するデジタル直接駆動技術が挙げられる[3]。この技術は、アナログ回路を用いずデジタル信号のみでコイルを制御することが可能であり、広範囲で精密な制御特性が期待される。

本論文では、デジタル直接駆動技術を用いた際の駆動領域と駆動効率の特性を検証する。今回は、簡単化のため他励モータを用いて実験を行う。

2. 従来手法

(1) 可変界磁モータ

ステータあるいはロータの一方が他方に移動できる構造をしている。ステータとロータの相対位置を変える事により、両者の対向面積を調整して界磁磁束を増減させる。界磁磁束を調整する事により適切な回転数およびトルクを取得できる。また、電機子に発生する逆起電力に応じて適切に界磁磁束を調整する事で高効率駆動を実現している。しかし、構造と制御が複雑であり、高度なハードウェア技術と制御技術が必要とされる。

(2) 弱め界磁制御

モータは印加電圧を高める事で回転数が上昇する。しかし、(1)式より回転数の上昇及び界磁磁束の増加に伴い電機子に生じる逆起電力が大きくなる。 V_c は逆起電力、 K_e は逆起電力定数、 ϕ は界磁磁束、 N は回転数である。逆起電力が大きくなると電機子電流が小さくなり、回転数およびトルクが低下してしまう。そこで、(3)式より界磁電流を制御し界磁磁束の増減を行うことで適切なトルクに調整する。 T はトルク、 k はトルク定数、 I_a は電機子電流である。界磁制御を行う事により、逆起電力に応じて適切に界磁磁束を調整する事ができ駆動領域を拡大する事が可能となる。

$$V_c = K_e \phi N \quad (1)$$

$$N = \frac{V_c}{K_e \phi} \quad (2)$$

$$T = k \phi I_a \quad (3)$$

(3) デジタル直接駆動技術

複数の分割したコイルを 0 と 1 のデジタル信号で直接駆動する事により、所望のトルク及び回転数を再現する駆動技術である。デジタル直接駆動技術は、 $\Delta\Sigma$ 変調器と Noise Shaping Dynamic Element Matching (NSDEM) によって構成される。コイルを複数の分割する事で $\Delta\Sigma$ 変調器によって量子化されたマルチレベルの信号を回路内で加算せずに各コイルに出力する事が可能となる。これより、低電圧でも高出力を取得でき、高効率駆動を実現している。この駆動技術を用いたマルチコイルモータシステムの構成図を図 1 に示す。

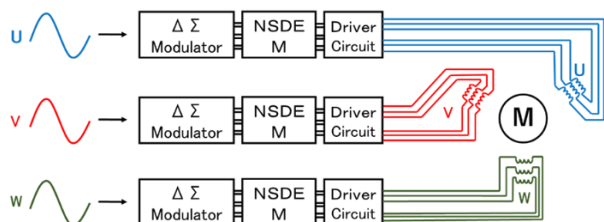


図 1. マルチコイルモータシステムの構成図

(4) $\Delta\Sigma$ 変調器

$\Delta\Sigma$ 変調器の構成図を図 2 に示す。 $\Delta\Sigma$ 変調器は積分器と量子化器、遅延回路で構成され、量子化器による量子化誤差を積分器で高帯域にシフトするノイズシェーピング特性が特徴である。量子化された信号は 0 と 1 のパルスで表され、信号の密度により振幅の大きさを再現する Pulse Density Modulation(PDM)で信号を出力する。

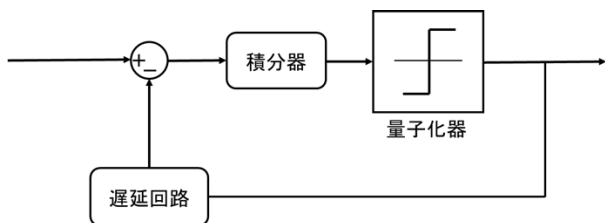


図 2. $\Delta\Sigma$ 変調器の構成図

(5) Noise Shaping Dynamic Element Matching (NSDEM)

NSDEM の構成図を図 3 に示す。NSDEM は積分器とソート回路、セレクト回路で構成されている。各相のコイルを駆動すると積分器でコイルの使用回数をカウントし、ソート回路で使用回数の少ない順に並び替える。さらに、セレクト回路で使用回数の少ないコイルを優先的に選択し、各コイルの使用回数を均一化する。その結果、素子ばらつきの影響による入力と出力の非線形性を図 4 のように改善でき、線形性を取り戻すことができる。この信号処理により、信号帯域付近のノイズフロアを低減できノイズシェーピングを実現している。

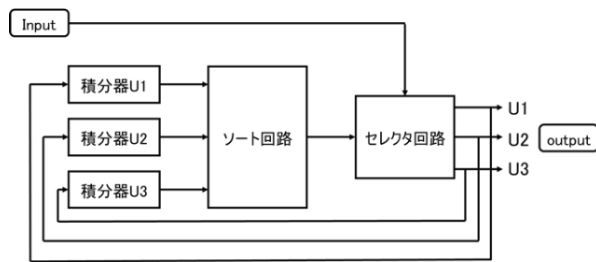


図 3. NSDEM の構成図

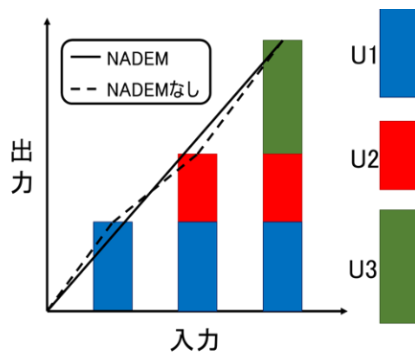


図 4. 素子ばらつきによる入出力の関係

3. 提案手法

デジタル直接駆動技術を用いて他励モータのステータコイルを駆動する。構造図を図 5 に示す。図 6 のようにステータコイルをマルチコイルにすることで、界磁電流を精密に制御することが可能となる。また、NSDEM を用いることで各コイルに流れる電流を等しくし小さくすることができる。その結果、ステータコイルでのスイッチング損失および銅損を低減することができる。

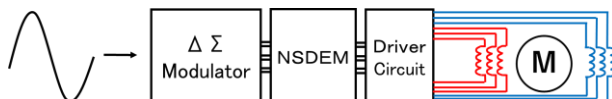


図 5. デジタル直接駆動技術による他励モータのステータコイル駆動

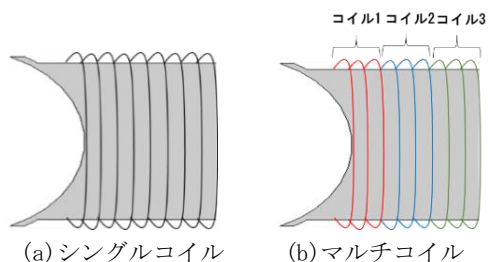


図 6. ステータコイルのマルチコイル化

4. 測定評価

(1) 測定環境

測定環境を図 7、図 8 に示す。

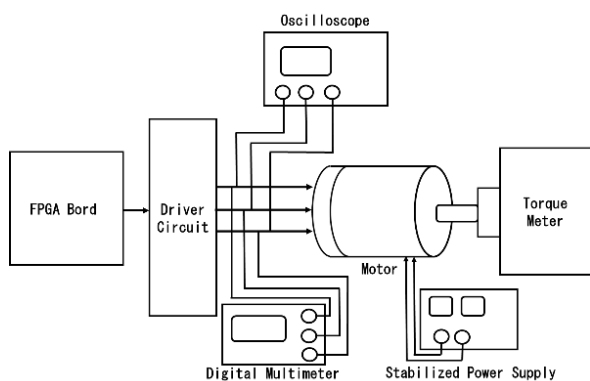


図 7. 測定環境

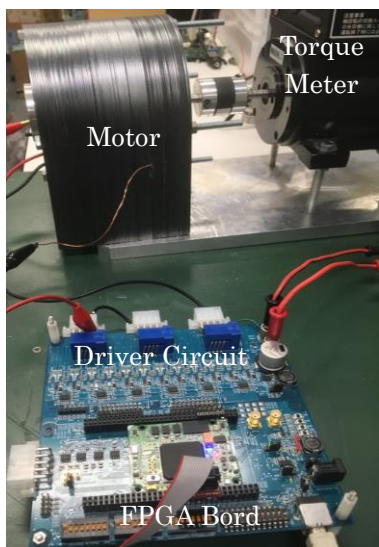


図 8. 測定環境 (写真)

(2) 測定方法

シングルコイルは $\Delta\Sigma$ 変調方式で駆動し、マルチコイルはデジタル直接駆動方式で駆動する。この際の駆動領域の測定評価を行う。

また、駆動電圧と電流、トルクを測定し、駆動効率の測定評価を行う。駆動効率は(4)式と(5)式に示す入力電力および機械出力により(6)式に導出する。 E は入力電力、 V_{in} は入力電圧、 I_{in} は入力電流、 M は機械出力、 N は回転速度、 T はトルク、 D は駆動効率、 E_r はロータの入力電力、 E_s はステータの入力電力である。

$$E = V_{in} I_{in} \quad (4)$$

$$M = NT \quad (5)$$

$$D = \frac{M}{E_r + E_s} \times 100 \quad (6)$$

(3) 測定結果

界磁電流に対する回転数の測定結果を図9と図10に示す。シングルコイルは100[rpm]で回転し始め、マルチコイルは82[rpm]で回転し始めた。

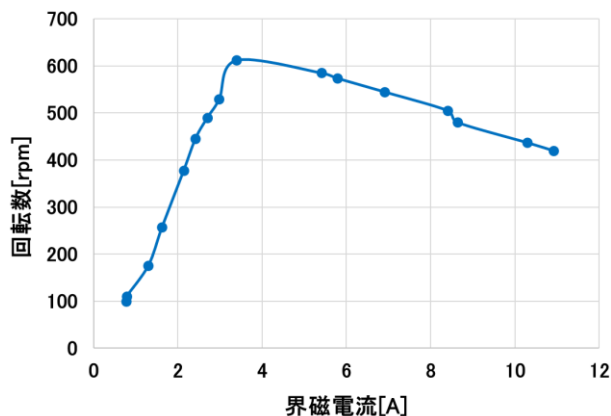


図 9. 界磁電流に対する回転数(シングルコイル)

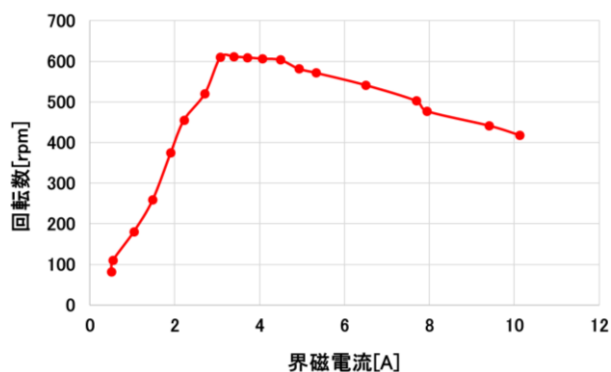


図 10. 界磁電流に対する回転数(マルチコイル)

(7)式、(8)式より、電機子に発生する逆起電力を導出する。 V_R はコイルにかかる正電圧、 R_M はコイル抵抗、 I_E は電機子電流、 V_C は逆起電力、 V_{dd} は印加電圧であり6[V]を供給した。

$$V_R = R_M I_E \quad [V] \quad (7)$$

$$V_C = V_{dd} - V_R \quad [V] \quad (8)$$

シングルコイルの逆起電力を表1に、マルチコイルの逆起電力を表2に示す。赤く塗られた逆起電力がコイルにかかる正電圧を上回る値を境に回転数が低下していく事が確認できる。

表 1. 逆起電力と回転数の関係 (シングルコイル)

正電圧[V]	逆起電力[V]	回転数[rpm]
5.40	0.60	100
5.38	0.62	110
5.33	0.67	181
5.07	0.93	259
4.72	1.28	375
4.43	1.57	446
4.14	1.86	490
3.84	2.16	529
3.10	2.90	612
2.51	3.49	585
2.30	3.70	574
2.27	3.73	545
1.78	4.22	505
1.68	4.32	480
1.40	4.60	437
1.22	4.78	420

表 2. 逆起電力と回転数の関係 (マルチコイル)

正電圧[V]	逆起電力[V]	回転数[rpm]
5.41	0.59	82
5.37	0.63	110
5.34	0.66	181
5.06	0.94	259
4.71	1.29	375
4.26	1.74	456
3.94	2.06	521
3.32	2.68	611
3.11	2.89	612
2.93	3.07	610
2.48	3.52	582
2.02	3.98	542
1.71	4.29	503
1.61	4.39	478
1.43	4.57	442
1.36	4.64	419

駆動効率の測定結果を図 11 に示す。また、マルチコイルによる駆動効率の向上率を表 3 に示す。図 11、表 3 より、マルチコイルにすることで低速域での駆動効率が大きく向上されていることが確認できる。

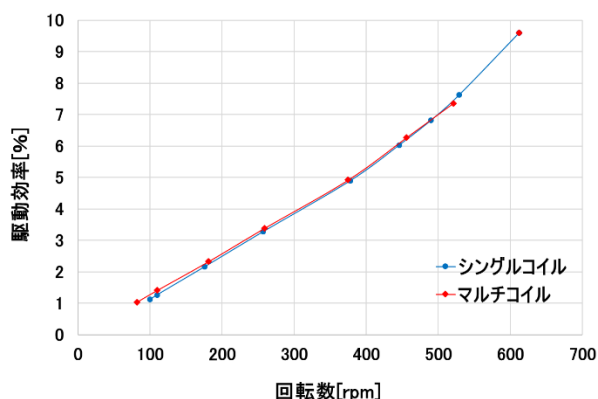


図 11. 駆動効率

表 3. マルチコイルによる駆動効率の向上率

回転数[rpm]	駆動効率の向上率[%]
110	11.407
181	7.568
259	3.468
375	0.509
612	0.004

NSDEM の有無によるステータコイルの銅損を図 12 に示す。また、NSDEM による銅損の低減率を表 4 に示す。図 12、表 4 より NSDEM を用いることで低速域での銅損が低減されていることが確認できる。

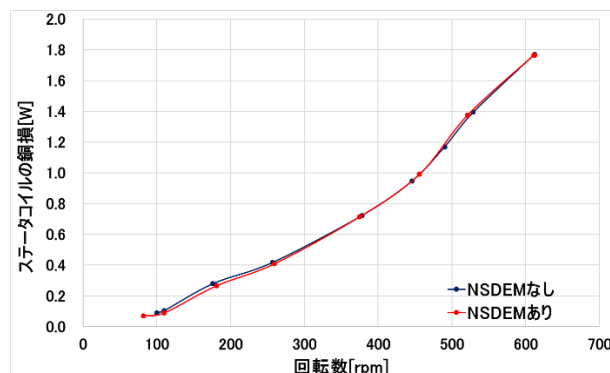


図 12. NSDEM の有無によるステータコイルの銅損

表 4. NSDEM による銅損の低減率

回転数[rpm]	界磁コイルの銅損[W]		銅損の低減率[%]
	NSDEMなし	NSDEMあり	
110	0.11	0.09	9.77
180	0.28	0.27	4.35
260	0.42	0.41	2.18
380	0.72	0.71	1.42
525	1.40	1.39	0.70
612	1.77	1.77	0.01

(4) 考察

図 9、図 10 より界磁電流を増加すると、ある値を境に回転数が減少していくことが確認できる。また表 1、表 2 より、逆起電力が正電圧を超えない値まで界磁電流を減少することや界磁電流を増加して静止トルクを高めることにより駆動領域を拡大できることが考えられる。

マルチコイルの動作イメージ図を図 13 に示す。また、スイッチング損失の導出式を (9) 式に示す。 P_{SW} はスイッチング損失、 V_{max} は電圧の最大値、 I_{max} は電流の最大値、 T_{on} は ON の立ち上がり時間、 T_{off} は OFF の立ち上がり時間、 f_{sw} はスイッチング周波数である。

$$P_{SW} = \frac{1}{6} V_{max} I_{max} (T_{on} + T_{off}) f_{sw} \quad (9)$$

マルチコイルは図 13 のように出力の大きさによってコイルの駆動数が決まる。これより、低出力領域では駆動するコイル数を少なくできドライバ回路でのスイッチング損失を抑えることができる。また、図 12、表 4 より NSDEM によって銅損が低減されていることが確認できた。これは NSDEM を用いることにより、各コイルに流れる電流を等しく小さくできたからである。これらの結果が、低速域の駆動効率向上に繋がったと考える。

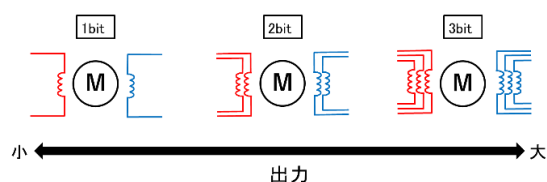


図 13. マルチコイルの動作イメージ図

4. 結論

本論文ではマルチコイルモータによる駆動領域の拡大を提案した。可変界磁モータは構造および制御が複雑であり、高度なハードウェア技術と制御技術が必要とされる。そこで、構造が単純で制御が簡易な他励モータとデジタル直接駆動技術を用いて界磁磁束を変化させ、駆動領域および駆動効率の特性を検証した。これより、ステータコイルをマルチコイル化する事で駆動領域の拡大と駆動効率の改善を確認できた。これらの結果から、本提案手法を広範囲な駆動領域と高効率駆動が要求される電気自動車やハイブリッド自動車に適応する事で、走行性能の向上および航続距離の延長が可能となる。

今後の展望としては、ステータコイルだけでなくロータコイルもデジタル直接駆動技術を用いて駆動する事で更なる駆動領域の拡大及び駆動効率改善を目指したい。

謝辞: 本研究を行うにあたり、ご指導頂いた安田彰教授、また鉄板の加工にあたり御協力頂いたワークショップの宮林様に心より御礼申し上げます。さらに、お世話になりました研究室の皆様に感謝致します。

参考文献

- 1) 加藤崇, 「自動車駆動用途における可変特性型高効率モータに関する研究」, 芝浦工業大学博士論文, 第1章 (2015)
- 2) 青山真大, 野口季彦, 「モータハードウェアの技術革新によるモータドライブの新展開ー可変界磁機能をもつモータの設計と制御の可能性ー」, 平成29年電気学会産業応用部門大会講演論文集, (2017-08-29), 3-S4-1
- 3) 山口圭, 「デジタル直接駆動型スピーカ技術を用いたモータ制御に関する研究」, 法政大学修士論文, (2012)
- 4) 野中剛, 大賀荘平, 大戸基道, 「可変界磁モータの駆動に関する検討」, 自動車研究会産業応用部門, 2012
- 5) 大賀荘平, 石井隆明, 野中剛, 大戸基道, 「可変界磁モータの試作と評価」, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, 201-206, 2013
- 6) 野中剛, 大賀荘平, 大戸基道, 「界磁モータの駆動に関する考察」, 電気学会論文誌(産業応用部門誌), 135(5), 451-456, 2015
- 7) 野中剛, 石井隆明, 大戸基道, 「簡易可変界磁モータの試作と評価」電気学会論文誌(産業応用部門誌), 137(6), 534-539, 2017
- 8) 森本茂雄, 畠中啓太, 童毅, 武田洋次, 平紗多賀男, 「PMモータの弱め磁束制御を用いた広範囲可変速運転」, 電気学会論文誌(産業応用部門誌), 112(3), 292-298, 1992
- 9) 山崎克巳, 大木俊治, 根津章, 池見健, 「弱め界磁制御時の高調波鉄損を低減したIPMモータの開発」, 電気学会論文誌(産業応用部門誌), 127(8), 837-843, 2007
- 10) 高橋勲, 芳賀仁, 「IPMモータの弱め界磁を利用した単相ダイオード整流回路の入力力率改善法」, 電気学会論文誌(産業応用部門誌), 123(12), 1467-1473, 2003
- 11) 河村篤男, 「電気自動車の駆動制御の動向と課題ーパワーエレクトロニクスとモータドライブの制御」, 計測と制御, 36(11), 793-799, 1997
- 12) 野中剛, 牧野省吾, 平山雅之, 大戸基道, 「可変界磁モータの構造検討と評価」, 平成25年電気学会全国大会論文集, 21-22, 2013
- 13) 石井隆明, 大賀荘平, 野中剛, 大戸基道, 「可変界磁モータの制御と効率評価」, 平成26年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 223-228, 2014
- 14) 入江寿一, 「DCチョップパの電圧積分値制御方式による直流他励電動機の駆動特性」, 電気学会論文誌, B102(12), 769-776, 1982
- 15) 松井信行, 松村武政, 足立良夫, 「チョップパで制御される直流他励電動機の特性の一改善法」, 電気学会論文誌, B93(3), 121-128, 1973
- 16) 知野照信, 「非線形を考慮した直流他励電動機の動特性解析」, 長野工業高等専門学校紀要, 10, 17-24, 1979
- 17) 原島昇, 「デジタル直接駆動モータシステムの大出力化に関する研究」, 法政大学大学院紀要理工学・工学研究科編 55, 2014
- 18) 塩澤純, 「マルチビットデジタル直接駆動技術を用いたモータ制御システム」, 法政大学大学院紀要理工学・工学研究科編 56, 2015
- 19) 山本佳樹, 「空間ベクトル $\Delta\Sigma$ 変調器とベクトル制御を用いたマルチコイルモータシステム」, 法政大学大学院理工学・工学研究科, 法政大学大学院紀要理工学・工学研究科編 58, 2017
- 20) 松尾遥, 「量子化誤差と製造誤差による素子バラツキの影響を低減させた高精度マルチコイルモータの実現」, 法政大学大学院理工学・工学研究科, 法政大学大学院紀要理工学・工学研究科編 58, 2017